

### 3.5 Ergebnisse eines Feldtests mit Mikro-BHKWs

Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin  
Dipl.-Ing. (FH) Eva Scheck

#### Abstract

*As interesting alternative to achieve a high energy efficiency, local power generation with block heat and power plants become more and more important. In the project "Energiepioniere – scientific-technical monitoring of a field test of Micro block heat and power plants" engines of different producers are proved. During two years the suitability of daily use of the Micro block heat and power plants was tested. Some of the most important results of the field test are presented in the following paper.*

#### Einleitung

Die dezentrale Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken gewinnt als Möglichkeit der effizienten Energieerzeugung immer mehr an Bedeutung. Im Projekt „Energiepioniere – Wissenschaftlich-technische Begleitung eines Feldtests von Mikro-BHKW-Anlagen durch die Hochschule Ofenburg“ werden verschiedene Mikro-BHKW-Anlagen auf ihre Praxistauglichkeit unter realen Betriebsbedingungen getestet. Im aktuellen Artikel wird nach einer kurzen Beschreibung der im Feldtest untersuchten Motoren ein Auszug der wichtigsten Ergebnisse des Feldtests vorgestellt.

#### Im Feldtest eingesetzte Motorentypen

Im Feldtest sind 11 Stirlingmotoren WhisperGen des Herstellers WhisperTech und 8 Freikolben-Dampfmotoren lion-Power-block der Fa. OTAG.

#### a) Stirlingmotor

Der Stirlingmotor WhisperGen Typ MkVb der Fa. WhisperTech ist ein voll-automatischer Heizkessel mit einer Standardwärmeleistung von 7 kW (mit Zusatzbrenner bis 12 kW) und einer elektrischen Leistung von 1 kW. Der Motor ist für die Anwendung in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie im Kleingewerbe konzipiert.

| Technische Daten WhisperGen                                      |                       |
|--|-----------------------|
| Doppelt wirkender Vierkolbenmotor mit außenliegender Verbrennung |                       |
| Standardwärmeleistung  | 7 kW                  |
| mit Zusatzbrenner  | 12 kW                 |
| elektrische Leistung   | 1 kW                  |
| Arbeitsmedium  | Stickstoff            |
| Drehzahlbereich  | 1.200 – 3.200 U./Min. |
| Abmessungen (BxHxT)  | 49,0 x 85,0 x 55,5 cm |
| Gewicht  | 137 kg                |
| Geräuschniveau   | 56 dB (A)             |

Der Dampfmotor lion-Powerblock der Fa. OTAG ist aktuell das einzige Mini-BHKW auf der Basis einer Dampfkraftmaschine. Mit einer thermischen Leistung von ca. 3 kW bis 16 kW und einer elektrischen Leistung von ca. 0,3 kW bis 2,0 kW ist der Motor für die Anwendung in Ein- und Dreifamilienhäusern sowie im Kleingewerbe konzipiert.

| Technische Daten lion-Motor |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Freikolben-Dampfmotor       |                         |
| Standardwärmeleistung       | 3 -16 kW                |
| elektrische Leistung        | 0,3 – 2 kW              |
| Arbeitsmedium               | Prozessdampf ca. 350 °C |
| Hubzahl                     | 2.400 – 4.500 Hübe/Min. |
| Abmessungen (BxHxT)         | 62 x 126 x 83 cm        |
| Gewicht                     | 195 kg                  |
| Geräuschniveau              | 48-54 dB(A)             |

#### Ergebnisse des Feldtests

Für die Bewertung und den Vergleich der Mikro-BHKW-Anlagen wurden auf Basis der erfassten Messdaten monatlich u.a. folgende Kennzahlen errechnet:

$$\text{Gesamtnutzungsgrad } N_{\text{ges}} = \frac{W_{\text{el(gez.)}} - W_{\text{el(bez.)}} + Q_{\text{therm.}}}{100 \cdot Q_{\text{Brennstoff}}} \times 100$$

$N_{\text{ges}}$  = Gesamtnutzungsgrad in %  
 $W_{\text{el(gez.)}}$  = Vom Stirlingmotor erzeugter Strom (gemessen an der Stromausspeisung des Motors) in kWh  
 $W_{\text{el(bez.)}}$  = Vom Stirlingmotor bezogener Strom in kWh  
 $Q_{\text{therm.}}$  = Vom Stirlingmotor erzeugte Wärmemenge in kWh  
 $Q_{\text{Brennstoff}}$  = Vom Stirlingmotor verbrauchte Erdgasmenge (errechnet mit Heizwert) in kWh

$$\text{Elektrischer Nutzungsgrad } N_{\text{el}} = \frac{W_{\text{el(gez.)}} - W_{\text{el(bez.)}}}{Q_{\text{Brennstoff}}} \times 100$$

#### Ergebnisse Stirlingmotor WhisperGen

Die Bandbreite der Gesamtnutzungsgrade der WhisperGen-Anlagen über den gesamten Zeitraum des Feldtests ist in Abbildung 3.5-3 dargestellt.

Die Gesamtnutzungsgrade liegen bei den WhisperGen-Anlagen zwischen 65 % und 95 %. In den Monaten Februar 2009 bis Juni 2009 ist bei allen betriebenen WhisperGen-Anlagen ein Absinken der Gesamtnutzungsgrade um ca. 10 % zu erkennen. Dies ist im Wesentlichen auf den sinkenden Wärmebedarf und die damit verbundene Reduktion der Wärmeerzeugung zurückzuführen.



Abb. 3.5-1: WhisperGen-Anlage MS01

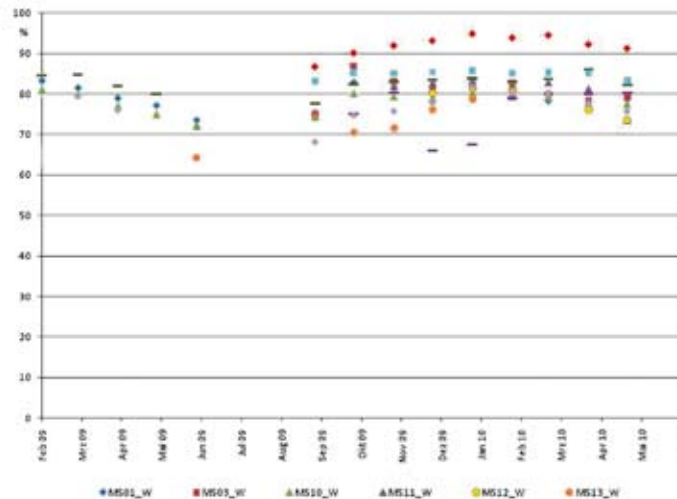


Abb. 3.5-2: lion-Powerblock MS04

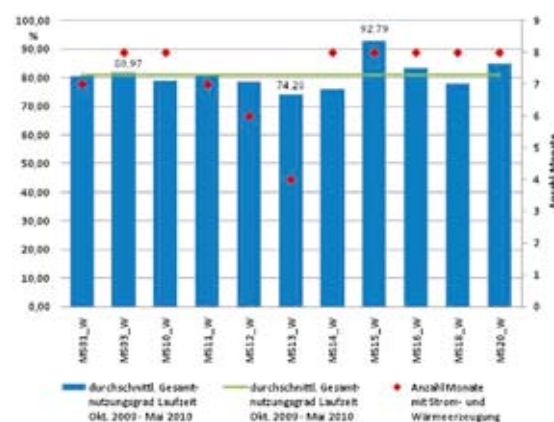
Da diese Abhängigkeit der Nutzungsgrade von der Höhe der Wärmeabnahme bzw. Wärmeerzeugung besteht, ist es wichtig, beim Anlagenvergleich die gleichen Zeiträume zu betrachten. Alle WhisperGen-Anlagen wurden von Oktober 2009 bis Mai 2010 betrieben und können deshalb auch in diesem Zeitraum direkt miteinander verglichen werden.

In Abbildung 3.5-4 sind die durchschnittlichen Gesamtnutzungsgrade über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Mai 2010 je WhisperGen-Anlage als blaue Balken dargestellt; als rote Rauten sind die Monate dargestellt, in denen von der jeweiligen Anlage täglich Strom und Wärme erzeugt wurde (rechte Skala). Die grüne Linie markiert den über alle WhisperGen-Anlagen errechneten durchschnittlichen Gesamtnutzungsgrad im Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Mai 2010. Abbildung 3.5-4 zeigt, dass der Großteil der WhisperGen-Anlagen nahe bei dem Durchschnittswert des Gesamtnutzungsgrads von 80,97 % liegt. Den höchsten Gesamtnutzungsgrad erreicht die Anlage MS15\_W mit 92,79 % und liegt damit als einzige Anlage über 90 %. Der niedrigste Gesamtnutzungsgrad liegt mit 74,28 % bei der Anlage MS13\_W vor. Bei der Anlage MS13\_W lag eine Anlagenstörung vor, die durch den Einbau eines falschen Außentemperaturfühlers verursacht wurde. Als Konsequenz hatte die Anlage regelungstechnische Probleme.

Für die primärenergetische und wirtschaftliche Anlagen-Bewertung einer Mikro-KWK-Anlage ist der elektrische Nutzungsgrad von entscheidender Bedeutung. Die durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrade je WhisperGen-Anlage über den Vergleichszeitraum von Oktober 2009 bis Mai 2010 sind im Diagramm Abbildung 3.5-5 dargestellt. Die roten Rauten zeigen die Anzahl der Monate, in denen von den Anlagen täglich Strom und Wärme erzeugt wurde. Der aus den monatlichen elektrischen Nutzungsgraden aller WhisperGen-Anlagen über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Mai 2010 errechnete durchschnittliche elektrische Nutzungsgrad liegt bei 4,57 % und ist in Abbildung 3.5-5 als orange Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschied-



**Abb. 3.5-4:** Durchschnittliche Gesamtnutzungsgrade je WhisperGen-Anlage (blaue Balken, linke Skala)



**Abb. 3.5-3:** Monatliche Gesamtnutzungsgrade der WhisperGen-Anlagen über den Zeitraum des Feldtests von Febr. 2009 bis Mai 2010

lichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

### Ergebnisse Dampfmotor lion-Powerblock

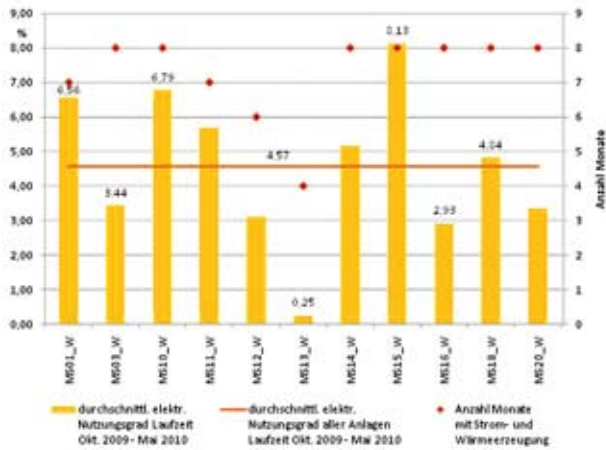
Bei allen lion-Anlagen gab es Ausfälle in der Stromerzeugung durch den Defekt des Linators. Nur eine Anlage (lion-Anlage MS05\_L) erzeugte über 12 von 13 Monaten Strom und Wärme. Die Betriebsprobleme der lion-Motoren konnten während der gesamten Dauer des Feldtests durch den Hersteller nicht behoben werden. Als Konsequenz liegt nur ein Monat vor (Dezember 2009), in dem von allen lion-Anlagen Strom und Wärme produziert wurde. Aus diesem Grund werden die Anlagen ausschließlich über die gesamte Dauer des Feldtests betrachtet, da ein Vergleich der Nutzungsgrade über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010 nicht sinnvoll ist.

Die Gesamtnutzungsgrade liegen bei den lion-Anlagen zwischen 80 % und 90 % und streuen mit einer Bandbreite von 10 % weniger als die Gesamtnut-

zungsgrade der Whisper-Gen-Anlagen. Der Zusammenhang zwischen Gesamtnutzungsgrad und sinkendem Wärmebedarf ist ebenfalls vorhanden; er fällt jedoch schwächer aus.

Der aus den monatlichen Gesamtnutzungsgraden aller lion-Anlagen über die gesamte Zeitdauer des Feldtests errechnete durchschnittliche Gesamtnutzungsgrad liegt bei 83,13 %. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

Der für die primärenergetische und wirtschaftliche Anlagen-Bewertung wichtige elektrische Nutzungsgrad streut bei den lion-Anlagen monatlich stark zwischen 2 % und 7,2 %. Ein Zusammenhang zwischen dem elektrischen Nutzungsgrad und der Wärmeerzeugung besteht bei der lion-Anlage MS05\_L. Bei dieser sinkt  $N_{el}$  in den Monaten März 2009 bis



**Abb. 3.5-5:** Durchschnittliche elektrische Nutzungsgrade je WhisperGen-Anlage (gelbe Balken, linke Skala)

werden. Der Gesamtnutzungsgrad schließt auch den Verbrauch an elektrischer Hilfsenergie mit ein und berücksichtigt thermische Systemverluste.

Bei der best-practise-Anlage MS15\_W des Feldtests ist die dezentrale Erzeugung der Nutzenergie unter den optimalen Rahmenbedingungen (maximaler Gesamtnutzungsgrad  $N_{ges}$  von 94,9 % im Januar 2010, siehe Abbildung 3.5-7) um 7 % effizienter als die getrennte Erzeugung von Wärme und Strom des Vergleichssystems (siehe Abbildung 3.5-8).

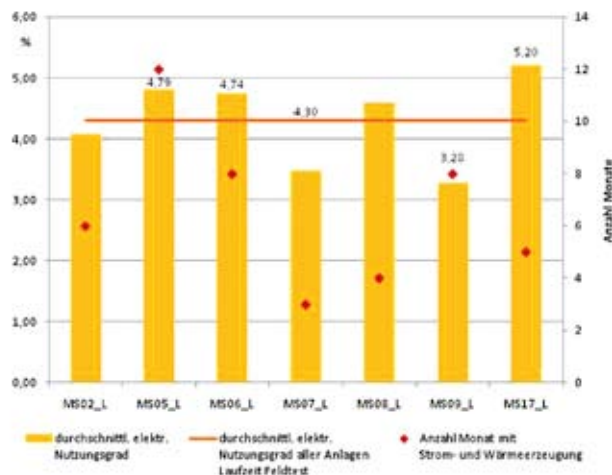
Obwohl die Anlage den vom Hersteller angegebenen elektrischen Nutzungsgrad von 8,7 % erreicht, erklärt sich der geringe Effizienzunterschied zum konventionellen Vergleichssystem wesentlich aus dem niedrigen elektrischen Nutzungsgrad des WhisperGen-Motors, der den energetisch positiven Effekt der dezentralen gekoppelten Erzeugung von Wärme und Strom wieder aufhebt.

### Fazit des Feldtests

Der Feldtest Energiepioniere liefert interessante Ergebnisse aus der Praxis und hat deutlich gemacht, wie wichtig die Erprobung von technischen Pilotanlagen unter realen Betriebsbedingungen ist.

Alle 8 im Feldtest begleiteten lion-Dampfmotoren haben in der Praxis die Erwartungen an den Betrieb und die Betriebsergebnisse nicht erreicht. Die getesteten lion-Anlagen – bis auf die Anlage MS05\_L – waren störungsanfällig und hatten starke Probleme mit der Stromerzeugung. Die Schwierigkeiten mit der Stromproduktion konnten im Zeitraum des Feldtests nicht behoben werden. Zusammenfassend haben sich die lion-Anlagen im Feldtest Energiepioniere unter realen Betriebsbedingungen nicht bewährt.

Die 11 WhisperGen-Anlagen haben sich im Feldtestbetrieb als zuverlässige und wenig störungsanfällige Anlagen erwiesen, die jedoch sehr unterschiedliches Betriebsverhalten aufweisen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Takthäufigkeit der Anlagen. Auch das Auftreten von Teillastbetrieben wirkt sich negativ auf die Anlagen-Nutzungsgrade aus. Als Ergebnisse resultieren erhebliche Differenzen der Nutzungsgrade. Der Feldtest zeigt, dass ein optimales Betriebsmanagement die Basis für den effizienten Anlagenbetrieb ist.



**Abb. 3.5-6:** Durchschnittliche elektrische Nutzungsgrade je lion-Anlage (gelbe Balken, linke Skala)

Mai 2009 um ca. 1,5 % und von Februar 2010 bis Mai 2010 um ca. 2 %. Die durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrade je lion-Anlage über deren Laufzeit sind in Diagramm Abbildung 3.5-6 dargestellt.

Die roten Rauten zeigen die Anzahl der Monate, in denen von den Anlagen täglich Strom und Wärme erzeugt wurde. Der aus den monatlichen elektrischen Nutzungsgraden aller lion-Anlagen über die gesamte Zeitdauer des Feldtests errechnete durchschnittliche elektrische Nutzungsgrad liegt bei 4,3 % und ist in Abbildung 3.5-6 als orange Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass keine der lion-Anlagen im Feldtest die Herstellerangaben erreicht hat. Mit einem elektrischen Nutzungsgrad von maximal 5,2 % ist die Stromerzeugung

für ein Mikro-BHKW gering. Die einzige Anlage MS05\_L, die ohne nennenswerte Stromausfälle stabil betrieben werden konnte, liefert mit einem elektrischen Nutzungsgrad von 4,79 % und geringer Strom- und Wärmeproduktion unbefriedigende Betriebsergebnisse.

### Primärenergetische Betrachtung

Um den energetischen Nutzen bzw. die Effizienz der im Feldtest eingesetzten Mikro-KWK-Motoren zu beurteilen, ist eine primärenergetische Analyse erforderlich.

Hierbei wird die in Mikro-KWK-Motoren gekoppelte Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie verglichen mit der getrennten Erzeugung von Wärme im Heizkessel und elektrischer Energie im Großkraftwerk (Vergleichssystem). Das Ergebnis der primärenergetischen Betrachtung ist stark von den angenommenen Nutzungsgraden abhängig.

Setzt man den im Stirlingmotor eingesetzten Brennstoff auf 100 % bzw. 100 Einheiten, so können die erzeugte elektrische Energie und die Wärme anhand der Nutzungsgrade des Motors ermittelt

Nur eine WhisperGen-Anlage, die best-practise-Anlage MS15\_W, erreicht unter Realbedingungen im Feldtest die vom Hersteller angegebenen Nutzungsgrade. Bei allen anderen 10 WhisperGen-Anlagen lag sowohl der Gesamtnutzungsgrad als auch der elektrische Nutzungsgrad deutlich unter den Herstellerangaben.

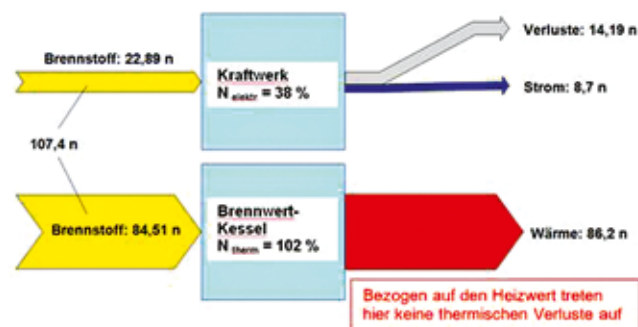
Als weitere Erkenntnis des Feldtests hat sich die GSM-Übertragung der Messdaten nicht als zuverlässiges Übertragungsmedium bewährt. Schwankungen der GSM-Empfangsstärke haben mehrfach zu zeitweiser Störung der Datenübertragung geführt; als Alternative würde hier in Zukunft der gleiche Modemtyp, jedoch mit Festnetzanschluss bevorzugt. Die primärenergetische Betrachtung zeigt, dass schon bei einem elektrischen Nutzungsgrad der Whisper-Gen-Motoren von 13 % die dezentrale Energieerzeugung um ca. 10 % effizienter wäre als die Stromerzeugung im Großkraftwerk. Die Erhöhung des elektrischen Nutzungsgrades wird für die Stirlingtechnologie in Zukunft ein wichtiger Erfolgsfaktor sein, um eine klimaschonende Alternative beispielsweise gegenüber der Brennwerttechnologie zu sein.

## Referenzen/References

- [1] Scheck E., Bollin E.: Abschlussbericht Energiepioniere: Wissenschaftlich-technische Begleitung eines Feldtests von Mikro-KWK-Anlagen durch die Hochschule Offenburg, 13.12.2010



**Abb. 3.5-7:** Sankey-Diagramm unter Annahme der im Feldtest ermittelten maximalen Nutzungsgrade der best-practise-Anlage MS15\_W



**Abb. 3.5-8:** Sankey-Diagramm Vergleichssystem unter Annahme der im Feldtest maximalen erreichten Nutzungsgrade der best-practise-Anlage MS15\_W